

Modelos de elementos finitos con aplicación tridimensional de la analogía fluido-fibra, para predecir el comportamiento mecánico de piezas estructurales de madera bajo la presencia de los principales tipos de nudos.

Pablo Guindos

Estudiante de Doctorado, Dep. de Ing. Agroforestal
Univ. de Santiago de Compostela (Lugo, España)
pablo.guindos@usc.es



Manuel Guaita

Catedrático de Universidad, Dep. de Ing. Agroforestal
Univ. de Santiago de Compostela (Lugo, España)
m.guaita@usc.es



Palabras clave – Analogía fluido-fibra, nudos, desviación de la fibra, modelo material, método de los elementos finitos, criterios de rotura.

Keywords – Flow-grain analogy, knots, grain deviation, material model, finite element method, failure criteria.

RESUMEN

Los nudos son los defectos que más disminuyen la resistencia de piezas de madera en la escala estructural, al ocasionar no solo una discontinuidad material, sino también la desviación de las fibras que se encuentran a su alrededor. En la década de los 80 se introdujo la teoría de la analogía fluido-fibra, como un método que aproximaba adecuadamente todas estas desviaciones. Sin embargo en su aplicación tridimensional, nunca se consideraron las diferencias geométricas en el sentido perpendicular al eje longitudinal de las piezas estructurales, lo cual imposibilitaba la simulación numérica de algunos de los principales tipos de nudos, y disminuía la precisión obtenida en aquellos nudos en los que la modelización sí era viable. En este trabajo se propone un modelo programado en lenguaje paramétrico de un software de elementos finitos que, bajo una formulación en tres dimensiones más general, permitirá estudiar de forma automatizada el comportamiento estructural de la madera bajo la influencia de los principales tipos de nudos, a partir de la geometría visible de los mismos y la posición de la médula en la pieza, y el cual ha sido contrastado experimentalmente, simulando de forma muy precisa el comportamiento mecánico de vigas sometidas a ensayos de flexión a cuatro puntos.

ABSTRACT

Knots are the defects that most reduce the strength of lumber at the structural level, by causing not only a material discontinuity but also the deviation of the fibers that surround them. In the 80's it was introduced the theory of the flow-grain analogy as a method to approximating adequately these deviations. However, in three-dimensional applications, geometrical differences in the direction perpendicular to the longitudinal axis of the structural specimens were never considered before, which prevented the numerical simulation of some of the main types of knots, and

decreased the achieved precision in those kind of knots where modeling itself was possible. This paper purposes a parametric model programmed in a finite element software, in the way that with a more general three-dimensional formulation, an automated study of the structural behavior of timber under the influence of the main types of knots is allowed by only knowing the visible geometry of such defects, and the position of the pith. Furthermore that has been confirmed experimentally obtaining very accurately simulations of the mechanical behavior of beams under four points bending test.

1. Introducción

Los nudos son las singularidades que más penalizan las propiedades de la madera para el uso estructural, afectando en mayor medida a la resistencia a tracción longitudinal, seguida del módulo de ruptura (M.O.R.), resistencia a compresión paralela y módulo de elasticidad longitudinal (M.O.E.) (Phillips et al, 1981). Ello es debido a que por un lado el tejido del nudo supone una discontinuidad en la distribución de tensiones a lo largo de los especímenes, y por el otro que las fibras situadas en sus proximidades sufren unas desviaciones que provocan la aparición componentes tensionales perpendiculares y de cortante, por lo que ambos aspectos resultan ser especialmente críticos cuando los miembros son solicitados a tracción.

De hecho, independientemente de que los nudos puedan estar sanos y exista por tanto una continuidad cambial entre tejidos de fuste y rama, la desviación de las fibras que alimentan la rama y colaboran en su crecimiento experimentan una brusca desviación perpendicular al eje longitudinal, que implica igualmente una discontinuidad en la distribución de esfuerzos axiales en la pieza, por lo que tal y como se demuestra en recientes investigaciones (Baño, 2009), aquellos defectos situados en partes traccionadas es mejor asimilarlos como “huecos” o zonas que carecen de material, mientras que aquellos que se sitúan en partes comprimidas deben estar adherentes al material subyacente.

Por otro lado de forma indirecta, la presencia de estos defectos supone para todas aquellas fibras que no forman parte de la rama un “obstáculo” que debe de ser esquivado para poder continuar con su crecimiento por lo que sufren unas declinaciones que provocan tensiones perpendiculares, siendo obviamente aquellas de tracción especialmente críticas en la madera.

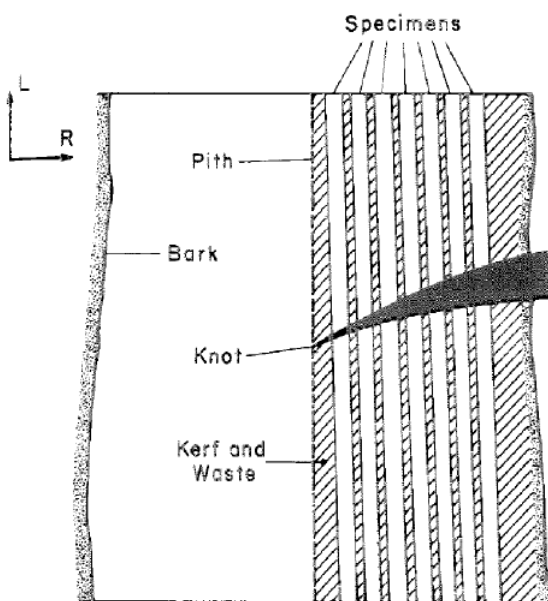


Figura 1a. – Paralelismo respecto del plano LT de los ejemplares escogidos inicialmente por Phillips et al, 1981, para argumentar la teoría de la analogía fluido-fibra.

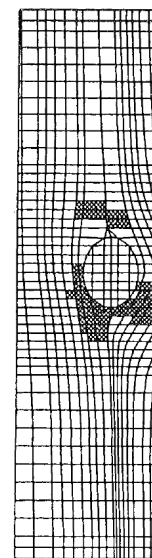


Figura 1b. – Ejemplo de modelo de M.E.F. con nudo pasante y mallado acorde a las líneas de corriente (Cramer et al, 1989)

En 1981 G. Phillips introdujo la teoría de la analogía fluido-fibra, con el objetivo de poder aproximar esas desviaciones desde un punto de vista teórico, aplicándola acertadamente en algunas maderas procedentes de coníferas de estructura interna simple. Su teoría consistía en equiparar la trayectoria de las fibras próximas a un nudo en el plano tangencial del tronco, a aquellas que sufrirían las partículas de un fluido en régimen laminar al esquivar un objeto elíptico, que se correspondería con la geometría del defecto. Esta asimilación se fundamentaba en que en el periodo de crecimiento las fibras se dispondrían acorde al ascenso de la sabia desde las raíces a la copa, por lo que su distribución podría calcularse cuantitativamente. De forma práctica la aplicación de esta teoría en los modelos de elementos finitos, consistía pues en emplear la ecuación correspondiente de mecánica de fluidos laminares con el fin de realizar un mallado acorde a las líneas de corriente y atribuyendo los ejes locales que describen la ortotropía propia de cada elemento de manera paralela a la forma de los mismos, tal como se ejemplifica en la Fig. 1b. De este modo fueron simulados de forma exitosa ejemplares con nudos pasantes paralelos al plano LT del tronco tal como se muestra en la Fig.1a. verificándose así la aptitud de esta técnica en numerosos experimentos (Zandenbergs et al,1988; Cramer et al, 1989; Masuda et al, 1994; Pellicane et al, 1994; Mihashi et al, 1999 entre otros), sin embargo los modelos generados fueron siempre bidimensionales o tridimensionales sin diferencias significativas en la sección LR.

Así, el planteamiento presentado causa dos grandes limitaciones al emplearlo en la gran mayoría de casos: por un lado, lo usual es que los nudos no sean pasantes, perpendiculares al plano tangencial de las piezas y al mismo tiempo que presenten diferencias en el plano radial despreciables, por lo que la casuística que es posible abarcar se reduce drásticamente, ver Fig. 2, donde se exponen los principales tipos de nudos. Y por el otro, condicionar el mallado siguiendo la distribución de líneas de corriente de acuerdo a la forma real de los nudos en tres dimensiones, resulta casi imposible, y más aún si se pretende realizar una malla constituida en su totalidad con elementos cuadrangulares ó hexaédricos que respeten las condiciones de forma. Esta última restricción sí ha sido solventada más recientemente (Saravi et al, 2002) para un caso bidimensional de nudos redondos, generando una malla independiente de las líneas de corriente y alineando los sistemas locales de coordenadas de los elementos con las direcciones que el vector velocidad del fluido laminar adquiriría en cada uno de ellos.

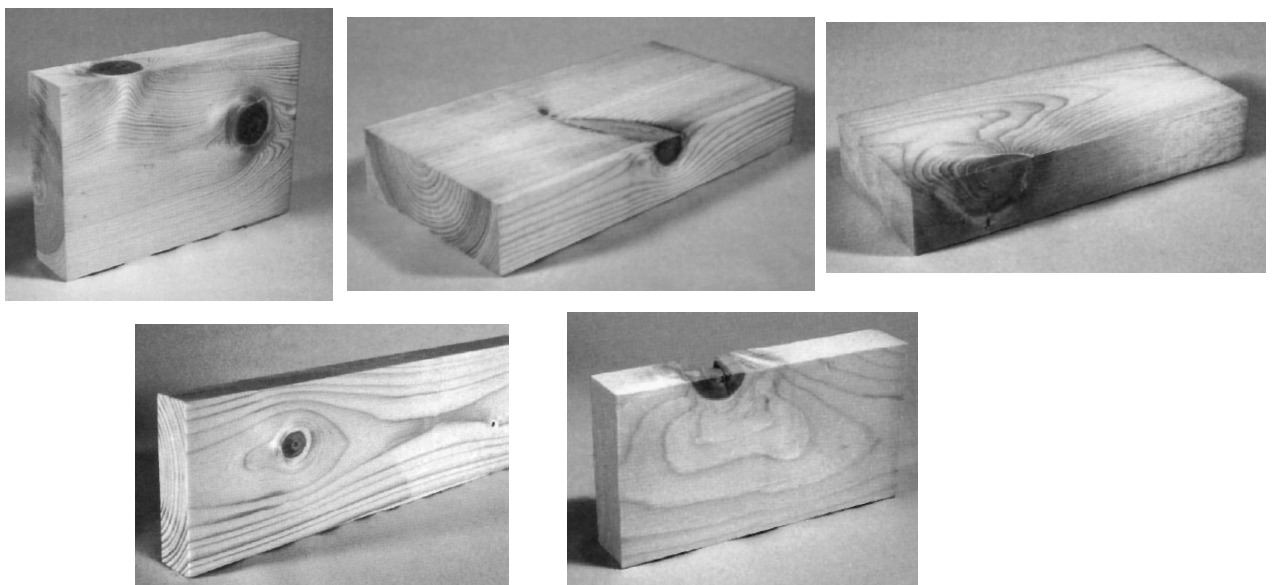


Figura 2. – Principales tipos de nudos respecto su posición en la pieza (de izquierda a derecha y de arriba a abajo): de canto y de cara, extendidos ó superficiales, de arista, pasantes de cara, pasantes de canto (prINSTA 142:2008).

Con este trabajo se pretende solventar los inconvenientes señalados anteriormente, proponiendo un modelo tridimensional más general, programado paramétricamente en un software de elementos finitos, de forma que se pueda predecir automáticamente el comportamiento mecánico de las piezas estructurales de madera bajo el efecto de los principales tipos de nudos, conociendo únicamente la geometría visible de los mismos y la posición de la médula en caso de existir.

Consecuentemente el alcance del modelo sería el de poder simular el comportamiento mecánico de nudos de canto y de cara, extendidos ó superficiales, de arista, pasantes interiores y exteriores, en cualquier tipo de pieza y bajo cualquier solicitación, por todo ello obviamente resulta imposible contrastar toda la casuística abarcada, así que en este caso el modelo ha sido especificado para predecir el comportamiento de 9 vigas sometidas a flexión de acuerdo a la norma UNE 408, de ahí la geometría y especificaciones mecánicas que se comentan posteriormente.

2. Características mecánicas del modelo

Las principales características que resumen la teoría mecánica general aplicada en los modelos son las siguientes:

- Isotropía transversal: se simplifican las variaciones entre las propiedades de los ejes R y T, por lo que el plano transversal al eje longitudinal adquiere propiedades isótropas. Así por ejemplo, para determinar el comportamiento mecánico en régimen elástico de la especie empleada en el estudio (*Pinus sylvestris*), se introdujeron las siguientes 5 constantes elásticas independientes, cuyas relaciones se extrajeron de la literatura especializada (Argüelles B. 1994; Argüelles A. et al, 1996):

Módulo de elasticidad longitudinal a tracción y a compresión: este parámetro fue obtenido indirectamente de forma experimental a partir del M.O.E. medido según la UNE 408, teniendo en cuenta el equilibrio entre volúmenes de tensión, y una relación entre módulos de $E_{t,L} = 1.2 \cdot E_{c,L}$

Módulo de elasticidad longitudinal en dirección transversal: $E_R = E_T = M.O.E./17$

Módulo de elasticidad transversal en secciones no isótropas: $G_{LR} = G_{LT} = M.O.E./16,075$

Coeficiente mayor de Poisson en secciones no isótropas: $\nu_{LT} = \nu_{LR} = 0,41$

Coeficiente de Poisson en sección isótropa: $\nu_{RT} = \nu_{TR} = 0,41$

- No linealidad material: los ensayos efectuados tendrán una duración reducida por lo que se descartan efectos reológicos, sin embargo, y pese a que la influencia de nudos es notable, se producirá una ligera plasticidad en estados de carga cercanos a la rotura de algunas vigas. El criterio empleado es el de plasticidad anisótropa propuesto inicialmente por Hill (Hill, 1947) con las modificaciones propuestas por Shih (Shih et al, 1978):

Los límites que determinan el comienzo de comportamiento elasto-plástico al definir la superficie inicial de fluencia son de $\sigma_{c,L} = 39 \text{ N/mm}^2$ y $\sigma_{c,R} = \sigma_{c,T} = 4,94 \text{ N/mm}^2$ para las compresiones longitudinales y transversales respectivamente.

El modelo de endurecimiento anisótropo es el dispuesto por Villiappan (Villiappan et al, 1976), empleando unos módulos tangentes de $E_{LTAN} = 3190 \text{ N/mm}^2$ y $E_{RTAN} = E_{TAN} = 139 \text{ N/mm}^2$, que describen la relación entre tensiones y deformaciones una vez rebasado el límite elástico de compresión en las direcciones longitudinales y transversales respectivamente.

Finalmente las deformaciones plásticas serán calculadas mediante una regla de flujo asociada.

- No linealidad geométrica: el programa tendrá en cuenta la deformación producida en la flexión antes de aplicar cada intervalo de carga.

4. Modelos de simulación

4. 1. Generación de la geometría de viga y nudos

El primer cálculo que realiza el modelo consiste en generar automáticamente la geometría de la viga y los nudos que se quieran considerar en el análisis, a partir de los parámetros necesarios para cada tipo de nudo, y que se describen a continuación.

Los nudos pasantes son asimilados como troncos de cono elípticos y oblicuos, cuyas bases elípticas se construyen a partir de los semiejes de las partes vistas de los nudos por ambas caras, siendo la generatriz el segmento que une las coordenadas de los centros de las dos elipses. Posteriormente este volumen es también rotado de acuerdo al ángulo que forma el semieje mayor de la base más grande con respecto al eje vertical de la pieza. Por ello, los parámetros necesarios para su construcción son los semiejes de ambas caras del nudo, las coordenadas de sus centros y el ángulo que forma la elipse mayor respecto de la vertical, cuando los nudos pasantes sean de canto las variables que no puedan ser medidas deberán ser estimadas.

Por su parte, el resto de nudos son equiparados a conos con el vértice ligeramente truncado con el fin de facilitar un mallado regular. Para crear estos volúmenes es necesario especificar por un lado los semiejes, coordenadas y ángulo de la elipse vista, al igual que en el caso anterior, y por el otro las coordenadas que localizan la médula en los extremos de la viga, de esta manera es posible extruír esta área a lo largo de la generatriz que parte desde el centro de la elipse para formar un ángulo equivalente al ángulo de inserción de rama con la médula, de acuerdo al sentido de crecimiento que se indique. Tras crear este cono truncado, se genera también un cilindro como “continuación” del mismo hasta la cara opuesta, su misión es facilitar el mallado regular y mejorar la calidad del análisis fluido. En resumen se deben de especificar los dos semiejes, el ángulo respecto de la vertical, las coordenadas del centro de la elipse y de la médula, y en caso de querer entroncar el cono oblicuamente con la médula, el ángulo de inserción de rama y el sentido de crecimiento, si alguna de las variables no puede ser medida deberá ser estimada.

4. 2. Análisis fluido

Tras crear la geometría de nudos y viga se procede a realizar un análisis fluido. Para poder construir un mallado independiente de las líneas de corriente, es necesario simular la circulación de un fluido laminar a través de la viga, registrando la orientación que el vector velocidad tiene en cada uno de los elementos, pudiendo alinear así los sistemas locales de coordenadas elementales con la disposición de dicho vector. Como paso previo a la construcción de esta parte del modelo, se midió experimentalmente la desviación de la fibra alrededor de varios nudos pasantes, que eran perpendiculares a las caras de las piezas y al plano LT del tronco en varias muestras de *Pinus sylvestris*, y se calibró bidimensionalmente la velocidad (v), viscosidad (η), y densidad (ρ) del fluido que se utilizaría en la simulación con el fin de asegurar un régimen de flujo laminar, y una distribución de líneas de corriente ajustada al patrón de formación de la especie utilizada.

El análisis fluido del modelo comienza, extruyendo las elipses situadas en el área perimetral de la pieza radialmente hacia afuera, conservando las proporciones y direcciones generatrices de los nudos, y posteriormente se forma un prisma rectangular de dimensiones superiores a la pieza, que envuelve enteramente la viga y los nudos. Este volumen mayor sirve de “conducto” para el fluido, considerando sus bases como las secciones de entrada y salida de fluido, y siendo el resto

de sus áreas, y las áreas perimetrales de los nudos y de sus continuaciones, los contornos sólidos que el fluido no podrá atravesar. Las dimensiones y disposición de este prisma son muy importantes para lograr una buena adaptación de las líneas de corriente:

- La desviación global de la fibra observada en las caras de la pieza (θ) define la inclinación vertical del conducto respecto del eje longitudinal de la pieza, mientras que la desviación global en los cantos (ϑ) hace rotar prisma rectangular en sentido perpendicular a las caras, de este modo la dirección longitudinal del conducto y por tanto la del fluido coincidirá, con la orientación espacial de la desviación global de la fibra, o sentido de crecimiento, pudiendo determinar las componentes de la velocidad (v) anteriormente calibrada, si imponemos que:

$$\theta = \text{atan}(v_y/v_x) \quad y \quad \vartheta = \text{atan}(v_z/v_x) \quad (1)$$

Las componentes cartesianas:

$$v_x = \sqrt{\frac{v^2}{1 + \tan^2\theta + \tan^2\vartheta}} \quad ; \quad v_y = \tan\theta * v_x \quad ; \quad v_z = \tan\vartheta * v_x \quad (2)$$

- Por otra parte el plano LT del fuste, donde la analogía fluido-fibra ha sido tradicionalmente contrastada, es aquel que resulta normal a la proyección axial de los nudos, y por tanto se le debe de atribuir al conducto una tercera rotación (κ) respecto del eje longitudinal de la pieza, correspondiente a la tangencia respecto el tronco, siendo determinada en nudos pasantes a partir de las coordenadas verticales de las caras vistas del nudo en ambas caras (y_a, y_b) y el ancho de la pieza (b), mientras que en el resto de nudos se deben de contabilizar las diferencias entre las coordenadas (y_a, z_a) de la cara vista del nudo respecto a las coordenadas del punto de entronque de generatriz con médula (y_e, z_e):

$$\kappa = \text{atan}\left(\frac{y_b - y_a}{b}\right) \text{ en nudos pastantes}; \quad \kappa = \text{atan}\left(\frac{y_e - y_a}{z_e - z_a}\right) \text{ en el resto de nudos} \quad (3)$$

Si en el análisis se considera más de un nudo, la rotación se efectúa atendiendo al más desfavorable.

- La longitud del prisma tiene que ser suficientemente larga como para poder abarcar la viga ó área de análisis de la pieza donde se encuentren los nudos, la profundidad lo bastante ajustada como para abarcar el canto de la viga después de producir las rotaciones, y el alto debe tener unas dimensiones mínimas como para que el contorno que suponen los cantos del conducto no afecten a las líneas de corriente.

Todo este proceso es calculado automáticamente, siendo únicamente necesario indicar al inicio del análisis la desviación global de la fibra en las caras y cantos de la pieza. Una vez producido el conducto por el que pasará el fluido, definidos los contornos y las componentes de velocidad, el modelo realiza un mallado regular con elementos fluidos hexaédricos, lleva a cabo el cálculo del fluido, y registra las componentes cartesianas de velocidad de cada uno de los elementos, calculando las desviaciones locales de los sistemas elementales con las relaciones angulares (θ y ϑ) anteriormente descritas.

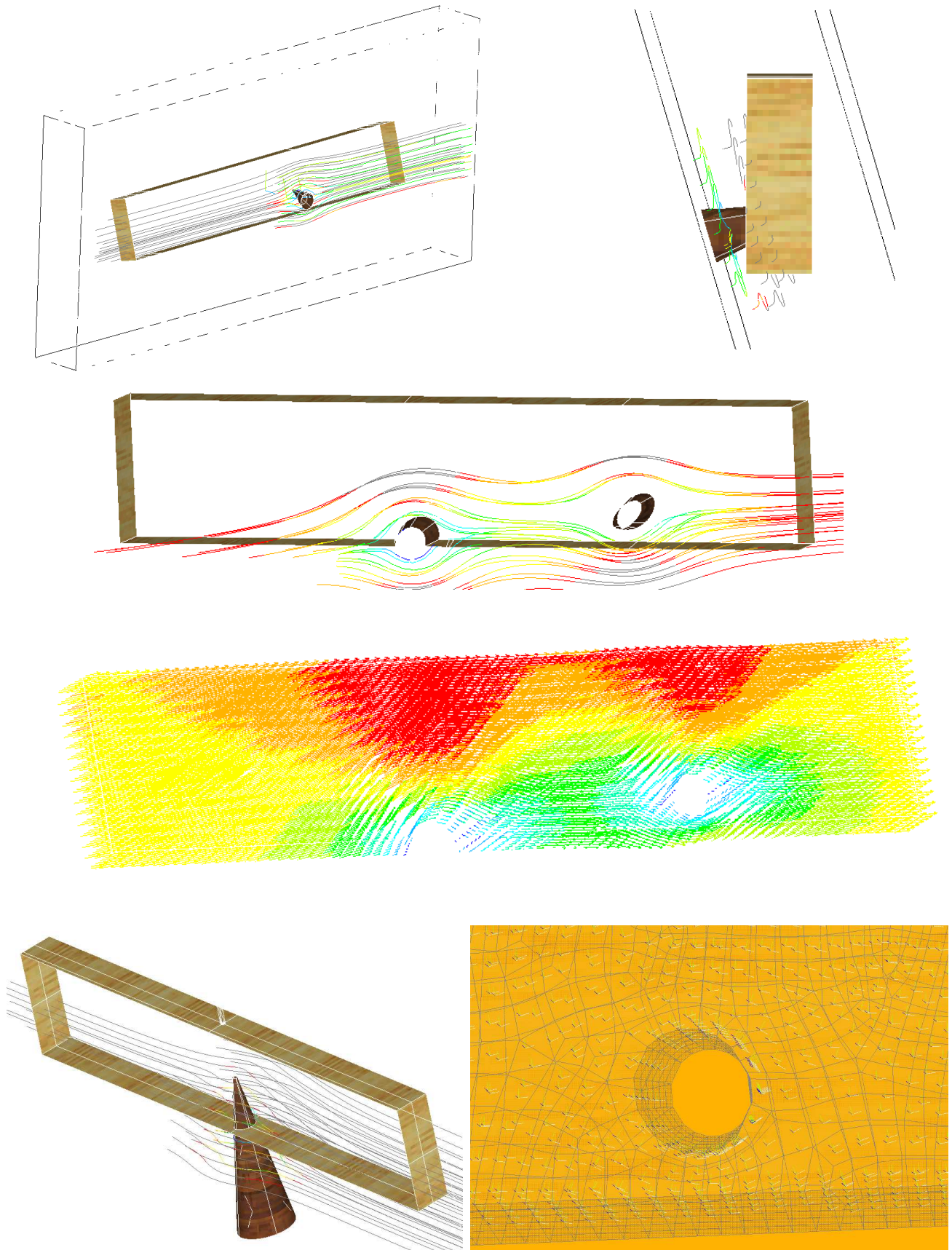


Figura 3. – Modelos tridimensionales con aplicación de la analogía fluido-fibra, de izq. a dcha. y de arriba a abajo: a) dimensiones y disposición de conducto alrededor de una viga; b) paralelismo entre líneas de corriente y plano LT; c) líneas de corriente en una viga con un nudo pasante de canto y otro de cara y gran desviación global de fibra; d) vectores velocidad elementales en una viga; e) líneas de corriente alrededor de un nudo de canto; f) alineación de los sistemas de coordenadas elementales respecto de los vectores velocidad.

4. 3. Análisis sólido

Tras almacenar la distribución de los sistemas elementales de coordenadas, se borran los elementos y el conducto, especificando las condiciones de no linealidad material y geométrica, y se realiza un nuevo mallado idéntico al anterior con elementos hexaédricos sólidos cuyos sistemas locales se encuentran correctamente orientados.

Finalmente, en un proceso iterativo se va incrementando la carga a la vez que se almacenan las deformaciones, y los índices de aprovechamiento de los criterios de fallo fenomenológico que se describen posteriormente, con el fin de contrastar las deformaciones y cargas de rotura con los datos obtenidos experimentalmente durante los ensayos según la norma UNE 408.

5. Rotura de las vigas y criterios para contrastar la validez de los modelos

Independientemente de que se llegue a producir plasticidad en las vigas ó no, la rotura de las 9 muestras siempre se produjo claramente en las fibras traccionadas próximas a un nudo, de ahí que se programasen los criterios de fallo fenomenológico frágil que se enumeran a continuación con el fin de conocer la carga teórica de agotamiento:

- Criterio de Hoffmann.
- Criterio de Tsai-Hill.
- Criterio de Tsai-Azzi.
- Criterio de Yamada-Sun extendido a tres dimensiones.
- Criterio de Norris.
- Criterio de Hashin.
- Criterio de Tsai-Wu, con factor de interacción teórico según J.Y. Liu (Liu, 1983).
- Criterio de Tsai-Wu, con factor de interacción experimental de acuerdo a los ensayos de tracción oblicua propuestos inicialmente por Tsai y Wu (Tsai et al, 1970), realizados por L.Boström para *Pinus sylvestris* (Boström, 1992).

Utilizando en todos los casos, los valores resistentes aconsejados en la literatura (Boström, 1992; Argüelles B. 1994; Thelandersson et al, 2003; Grekin 2006) para la especie empleada:

$$f_{t,0} = 89 \text{ N/mm}^2 \quad ; \quad f_{c,0} = 57 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,90} = 4 \text{ N/mm}^2 \quad ; \quad f_{c,90} = 7,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,0} = 9,5 \text{ N/mm}^2 \quad ; \quad f_{v,90} = 13,3 \text{ N/mm}^2$$

Para poder realizar un contraste coherente de la carga de rotura experimental con estos criterios, resulta primordial asegurar exactamente cuál de los nudos de la viga es el causante de la rotura, así como la carga a la que ésta se inició. Para lograr este propósito, se llevó a cabo un control fotográfico con tres cámaras digitales, que en conexión con la prensa, disparaban simultáneamente una fotografía cada 5 segundos (ver Fig. 4a) registrando el nudo ó nudos causantes de la rotura así como la carga a la que se produjo. Además, esta técnica permitió por otra parte hacer una restitución fotogramétrica de cada ensayo, de modo que se compararon adicionalmente las flechas experimentales de una media de 65 nudos del modelo de elementos finitos con los desplazamientos o corrimientos experimentales medidos en los fotogramas.

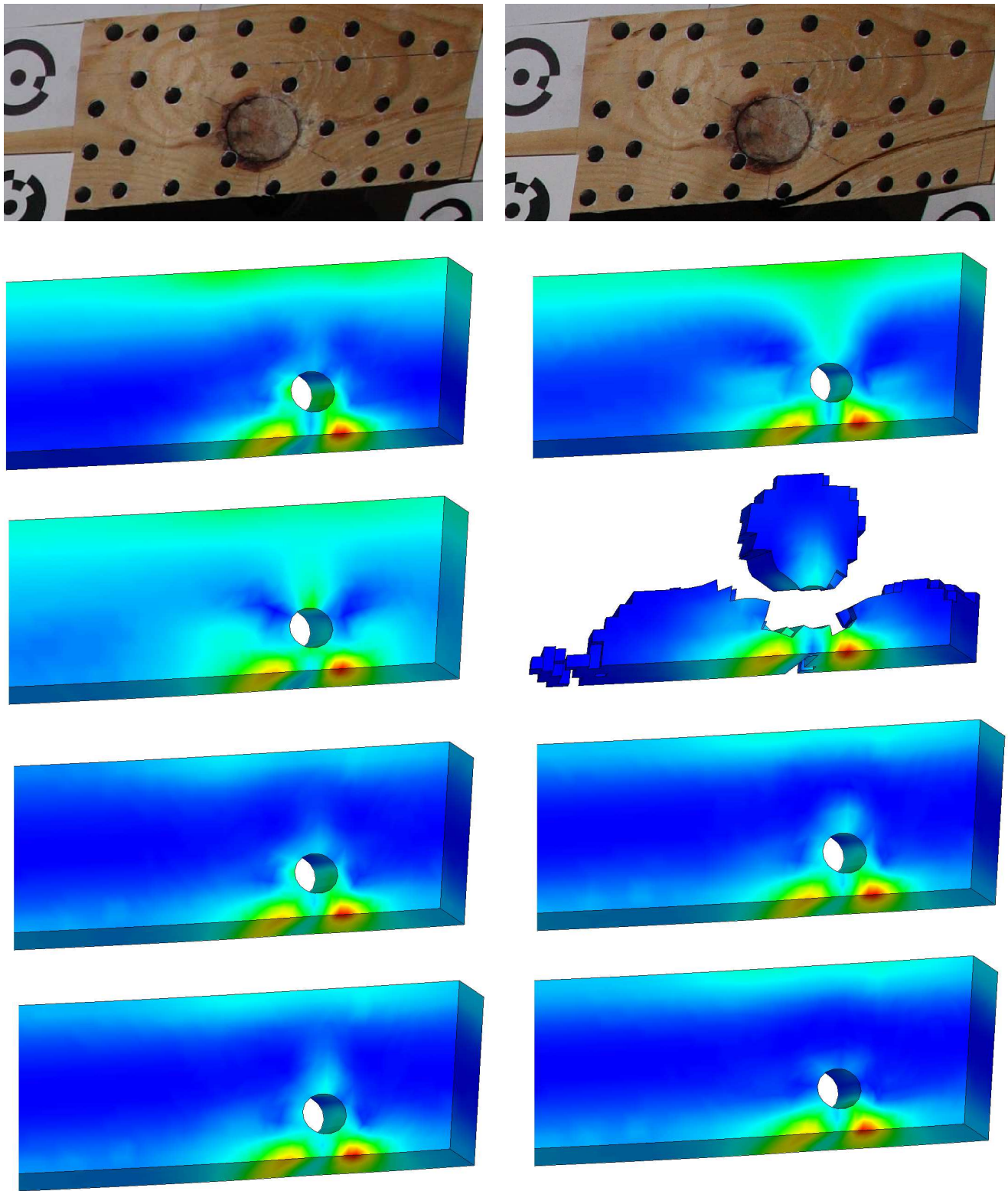


Figura 4a – En las 2 primeras imágenes se muestra el registro del nudo causante de la rotura, obtención de carga de rotura y flechas de una viga a través del control fotogramétrico.

Figura 4b – En las 8 siguientes imágenes se exponen los índices de agotamiento obtenidos tras la simulación de la viga anterior, indicándose con colores cálidos un mayor índice de aprovechamiento y con colores fríos un menor grado de agotamiento, de izquierda a derecha y de arriba a abajo los criterios fenomenológicos son: Hoffmann, Tsai Wu (Liu), Tsai Wu (experimental), Hashin (modo tracción perpendicular), Tsai-Hill, Norris, Tsai Azzi y Yamada-Sun extendido.

5. Resultados

Tras contrastar la rotura de 9 vigas de dimensiones 3000x50x150mm de la especie nombrada tal como se presenta en la Figura 4b, el criterio de fallo fenomenológico más acertado de acuerdo al tamaño elemental empleado ha resultado ser el de Tsai-Hill, pudiendo predecir la carga de rotura con un error medio absoluto del 4.83%. En la Tab. 5 se resumen los intervalos entre fotogramas en los que los nudos produjeron la rotura en cada una de las vigas, así como el tiempo de ensayo, la carga aplicada, la carga estimada, y error absoluto correspondiente a cada uno de estos criterios:

Viga	Fotogramas/ Tiempo de ensayo (seg.)	Carga Aplicada (kN)	Predicción de los criterios de Rotura Carga estimada (kN) / Porcentaje de error absoluto (%)							
			Tsai-Wu (Exp.)	Hashin	Hoffmann	Norris	Tsai- Azzi	Tsai-Hill	Tsai-Wu (Liu)	Yamada
1	74-75 285	13.89	12.6 9.287	15.5 11.591	14.90 7.27	14.85 6.911	13.8 0.648	14.35 3.312	17.2 23.830	14.7 5.832
2	48-49 246	11.5	9.6 16.522	11.55 0.435	11.15 3.043	11.45 0.435	10.65 7.391	11.2 2.609	12.95 12.609	11.65 1.304
3	63-64 238	11.38	10.15 10.808	12.4 8.963	11.90 4.569	12.1 6.327	11.2 1.582	11.75 3.251	13.9 22.144	12.25 7.645
4	76-77 239	11.41	10.3 9.728	12.45 9.115	12.15 6.486	12.45 9.115	11.55 1.227	12.1 6.047	14.15 24.014	12.65 10.868
5	60-61 232	11.31	10.2 9.814	12.25 8.311	12.10 6.985	12.6 11.406	11.7 3.448	12.05 6.543	13.65 20.690	12.3 8.753
6	56-57 282	13.53	9.15 32.373	11.05 18.330	12.45 7.982	13.6 0.517	12.65 6.504	12.55 7.243	12.8 5.395	12.2 9.830
7	51-52 258	12.58	9.4 25.278	11.05 12.162	10.90 13.355	11.4 9.340	10.6 15.739	11.55 8.188	12.65 0.556	11.15 11.367
8	69-70 295	14.25	11.3 20.702	13.5 5.263	14.40 1.053	15.3 7.368	14.75 3.509	14.95 4.912	15.8 10.877	14.0 1.754
9	55-56 258	13.02	9.05 30.492	11.2 13.978	12.65 2.842	13.5 3.687	13.5 3.687	13.2 1.382	15.2 16.743	13.25 1.767
Error Medio Absoluto			18.334	9.794	5.954	6.127	4.859	4.832	15.207	6.569

Tabla 5 – Errores absolutos en la predicción de carga de rotura de los distintos criterios de fallo.

Por otra parte, la fidelidad lograda al contrastar las flechas en un promedio de 65 nudos situados el tercio central de cada viga, a lo largo de varios instantes durante ensayos hasta su rotura alcanza un valor medio del 9,38%, concretamente un 8,98% de exactitud en nudos pertenecientes a zonas no influidas por el efecto de los nudos, y un 9,91% en zonas próximas a los defectos.

6. Conclusiones

La aplicación tridimensional de la analogía fluido-fibra sobre conos y troncos de cono oblicuos y de base elíptica y rotada, bajo las premisas de isotropía transversal, plasticidad anisótropa y no linealidad geométrica ha permitido simular con gran exactitud y versatilidad el comportamiento mecánico de piezas de madera de tamaño estructural bajo la presencia de los principales tipos de nudos, lo cual permitirá en un futuro seguir profundizando en el conocimiento de este material, ya sea desde un punto de vista teórico generando simulaciones más precisas en todos los ámbitos, contrastando modelos de rotura ó cualquier otra característica mecánica, ó bien desde un punto de vista más práctico, contribuyendo en la elaboración de normativa de clasificación estructural más precisa ó en tareas de rehabilitación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Gobierno de España a través del Programa Nacional de Formación del Profesorado Universitario (F.P.U.), y el Plan Nacional del Ministerio de Ciencia y

Tecnología (proyecto AGL2009-11331), así como aquel dispensado por la Plataforma de Enxeñería da Madeira Estructural (PEMADE-USC) y el departamento Arquitectura de la Universidade do Minho,

Referencias Bibliográficas

- Argüelles B. (1994). "Predicción con simulación animada del comportamiento de piezas de Madera" PhD Thesis, Polytechnical University of Madrid. Spain.
- Argüelles A., Arriaga F (2000). "Estructuras de madera diseño y cálculo", Book, Ed AITIM, Spain.
- Boström L. (1992). "Method for determination of the softening behavior of wood and the applicability of a non linear fracture mechanics model", PhD Thesis, Lund University, Sweden.
- Baño V.(2009). "Análisis mediante simulación numérica de la pérdida de resistencia de la madera por la presencia de nudos", PhD Thesis, Universersity of Santiago de Compostela, Spain.
- Cramer M. Fohrell W. (1989). "Method for simulating tension performance of lumber members". Journal of structural engineering 116(10), 2729-2745.
- Grekin, M. (2006). "Nordic Scots pine vs. selected competing species and non-wood substitute materials in mechanical wood products. Literature survey". Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 36, Finnish Forest Research Institute, Finland.
- Hill, R. (1947). "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences (193), 281-297.
- prINSTA 142:2008 (2008). "Visual strength grading of Nordic T- and LT- timber".Rule.
- Liu J.Y. (1984). "Evaluation of the tensor polynomial strength theory for wood", Journal of composite materials 18(3). 216-226.
- Masuda M. Honda R. (1994). "Theoretical analysis on bending of lumber containing knots by using finite element method", Journal of the Japan Wood Research Society (40). 127-133.
- Mihashi H. Navi P. Sunderland H. Itagaki N. Ninomiya S. (1999). "Micromechanics of Knot's Influence on Tensile Strength of Japanese Cedar", Proceedings of First Rilem symposium on Timber Engineering, Stockholm, Sweden.
- Pellicane P.J. Franco N. (1999). "Modeling wood pole failure. Part 2: Material and geometric considerations". Wood science and Technology (28). 261-274.
- Phillips, G.E. Bodig J. Goodman J.R. (1981). "Flow grain analogy". Wood Science (14), 55-64.
- Saravi, A. Lawrence, P.D. Lam, F. (2002) "Implementatiojn of a mechanics based system for estimating the strength of timber". IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Anchorage, USA.
- Shih C. F. Lee D. (1978). "Further Developments in Anisotropic Plasticity". Journal of Engineering Materials and Technology (100), 294-302.
- Thelandersson S. Larsen H.J. (2003) "Timber Engineering". Book. Ed Wiley, UK.
- Tsai S.W. Wu E.M. (1971). "A general theory of strength for anisotropic materials". Journal of composite materials 5(1). 58-80.
- Valliappan, S. Boonlaulohr, P. Lee, I.K. (1976), "Non-linear analysis for anisotropic materials". International Journal for Numerical Methods in Engineering (10), 597-606.
- Zandenbergs J.G. Smith F.W. (1988). "Finite element fracture prediction for wood with knots and cross grain". Wood and fiber science 20(1), 97-106.